Condensatoren

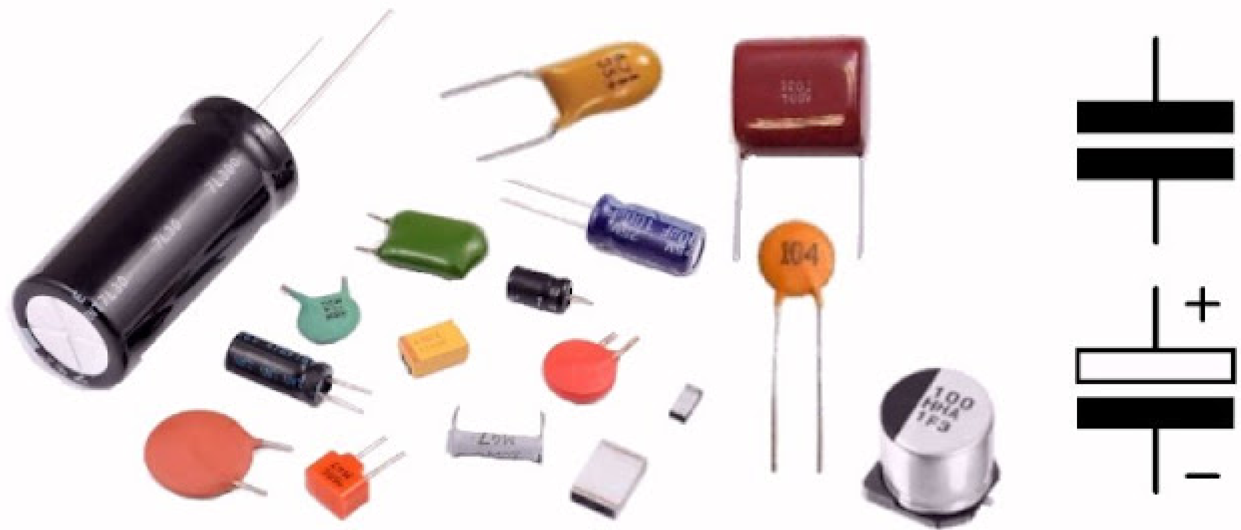
Condensatoren zijn, na weerstanden, de meest gebruikte elektronische onderdelen. De gemiddelde hobbyist vindt alleen het type, de waarde en de werkspanning belangrijk. Maar er is veel meer te vertellen over deze onderdelen!

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 19-11-2024

Algemene begrippen over '*de condensator*'

Wat is een condensator?
Een condensator is samengesteld uit twee elektrisch geleidende oppervlakken, gescheiden door een isolerende stof. De geleidende oppervlakken noemt men de platen, elektroden of armaturen van de condensator, de isolerende stof het diëlektricum. Uit deze definitie volgt de logica in het elektronische tekensymbool van een condensator: twee balkjes, op enige afstand van elkaar getekend, zie de onderstaande figuur rechts.
De waarde van de condensator wordt gegeven door de onderstaande formule:
$C = [A / d] \cdot \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r$
In deze formule staat:
- C voor de waarde van de condensator in farad
- A voor de oppervlakte van de platen in vierkante meter
- d voor de afstand tussen de platen in meter
- ε_o voor de permittiviteit van de lucht (8,85 • 10-12 F/m)
- ε_r voor de permittiviteit van het diëlektricum

Permittiviteit (in het Engels permittivity) is een natuurkundige eigenschap van een materiaal die aangeeft hoe goed het elektrische veld zich door dat materiaal kan voortplanten.
De meeste condensatoren zijn ongepoold. Dat wil zeggen dat het niet uitmaakt hoe u een gelijkspanning op de condensator aansluit. Die worden voorgesteld door het symbool met de twee identieke zwarte balkjes. Sommige condensatoren, zoals de elektrolytische, zijn echter gepoold. Dat wil zeggen dat deze één aansluiting hebben die op een positieve spanning moet staan ten opzichte van de tweede aansluiting. De positieve aansluiting wordt voorgesteld door een leeg balkje, de negatieve door een zwart balkje.

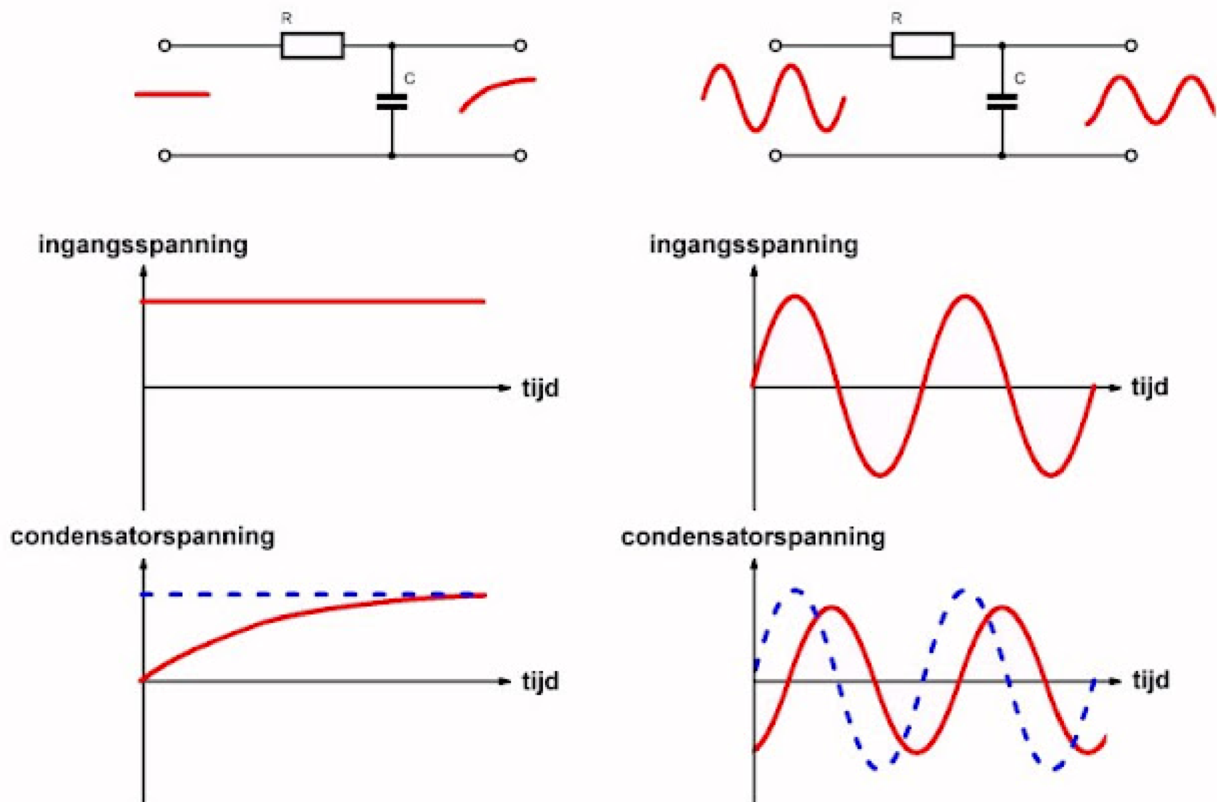


Diverse soorten condensatoren en hun symbolen. (© 2024 Jos Verstraten)

Diverse soorten condensatoren
In de bovenstaande foto staat links een aantal elektronische onderdelen die er heel verschillend uitzien, maar één eigenschap gemeen hebben: het zijn condensatoren. De afmetingen en de vorm zijn zo divers omdat condensatoren heel verschillende waardes kunnen hebben en bestand kunnen zijn tegen heel uiteenlopende spanningen.
U kunt in de praktijk de onderstaande types tegenkomen:

- Keramische condensatoren
- Mica condensatoren
- Film condensatoren
- Papier condensatoren
- Elektrolytische condensatoren
- Tantaal condensatoren
- Niobium condensatoren
- Supercondensatoren

Wat doet een condensator?
Een condensator is een elektronisch component dat elektrische lading opslaat en nadien weer vrijgeeft. Dat noemt men het '*laden*' en het '*ontladen*' van de condensator. De lading uit zich onder de vorm van een spanning die over de condensator staat en die u kunt meten door een voltmeter over de condensator aan te sluiten.
Als u een condensator C via een serieweerstand R aansluit op een gelijkspanning gaat er een bepaalde tijd een stroom door de weerstand vloeien die de condensator oplaadt tot er een door de waarde van de condensator bepaalde lading in het onderdeel is opgeslagen. Die stroom wordt steeds kleiner en uiteindelijk zelfs nul. De condensator is volledig opgeladen en de situatie blijft ongewijzigd. Voor gelijkspanning heeft een condensator dus, na lading, een oneindig hoge weerstand. Deze situatie ziet u in de onderstaande tekening links.
Als u echter die condensator C via de serieweerstand R aansluit op een wisselspanning wil de condensator altijd opladen tot de momentane waarde van de wisselspanning. Maar omdat de waarde van de wisselspanning steeds verandert zal de spanning over de condensator altijd iets achter lopen op die wisselspanning. Door de serieweerstand vloeit dus altijd een wisselstroom die probeert de spanning over de condensator gelijk te maken aan de variërende spanning aan de ingang, maar daar nooit in slaagt. Er vloeit nu dus steeds een stroom door de RC-kring, waaruit u kunt besluiten dat een condensator voor wisselspanning altijd een bepaalde weerstand heeft. Die wisselstroom weerstand noemt men de '*impedantie*' en wordt ook uitgedrukt in ohm. Het gevolg van het vloeien van deze stroom is dat er een wisselspanning valt over de weerstand R, waardoor de spanning over de condensator C altijd kleiner zal zijn dan de spanning aan de ingang van de RC-kring. Deze situatie is voorgesteld in de rechter tekening in de onderstaande figuur.



Het laden van een condensator bij gelijk- en bij wisselspanning. (© 2024 Jos Verstraten)

De oudste vorm van condensator

De oudste vorm van condensator is ongetwijfeld de '*Leidsche fles*', in 1746 uitgevonden door de Leidse professor Pieter van Musschenbroek. Dat was een glazen pot, gevuld met metaalschilfers en aan de buitenzijde voorzien van een fijnmazig metalen gaas. Zo'n fles kunt u gemakkelijk zélf maken! Deze fles voldeed dus volledig aan de definitie van een condensator. De praktische condensatoren waren in de beginjaren van de elektronica opgebouwd uit twee stroken aluminiumfolie, voorzien van dunne papieren isolatie-lagen en samen opgerold tot een soort elektronische rollade. In de loop der jaren zijn de praktische uitvoeringsvormen van condensatoren steeds meer geperfectioneerd, zodat de net beschreven papiercondensator zo goed als volledig verdwenen is.

Uit de definitie van wat een condensator is zou volgen dat bijvoorbeeld twee metalen soeppannen, op een houten tafel gezet, een condensator vormen. Dat klopt dan ook, in feite vormt ieder min of meer elektrische stroom geleidend voorwerp met alle andere min of meer elektrische stroom geleidende voorwerpen in zijn omgeving condensatoren. Hieruit kunt u heel wat verschijnselen uit de elektronica verklaren, zoals de beperkte bandbreedte van gelijk welk analoog systeem. De zogenoemde parasitaire capaciteiten die de onderdelen ten opzichte van elkaar vertonen, zorgen ervoor dat hoge frequenties verzwakt worden.



Een paar 'Leidsche flessen'.
(© Spark Museum of Electrical Invention)

De eenheid farad van een condensator
De eenheid van de waarde (= capaciteit) van een condensator is de farad (F), net zoals de meter de eenheid van de lengte is en de graad celsius de eenheid van temperatuur.
Men zegt dat een condensator een waarde van één farad heeft, als een spanning van één volt er een lading van één coulomb in kan opstapelen. Die waarde van 1 F is echter in de praktijk veel te groot. Vandaar dat men in het dagelijkse elektronica geknutsel steeds werkt met onderdelen van de farad. Praktisch gebruikte waarden zijn:

- De milli-farad, afgekort tot mF en gelijk aan een duizendste (10^{-3}) van een farad.
- De micro-farad, afgekort tot µF en gelijk aan een miljoenste (10^{-6}) van een farad.
- De nano-farad, afgekort nF en gelijk aan een miljardste (10^{-9}) van een farad.
- De pico-farad, afgekort pF en gelijk aan een biljoenste (10^{-12}) van een farad.

Als u volgende omrekeningsfactoren in gedachten houdt kan er nooit wat misgaan:

- 1 µF = 1.000 nF
- 1 nF = 1.000 pF
- 1 µF = 1.000.000 pF
- 1 nF = 0,001 µF
- 1 pF = 0,001 nF

De in de elektronische praktijk van alledag gebruikte waarden liggen tussen 10 pF en 10.000 µF.

De waarde van een condensator
De waarde van een condensator is afhankelijk van twee grootheden:

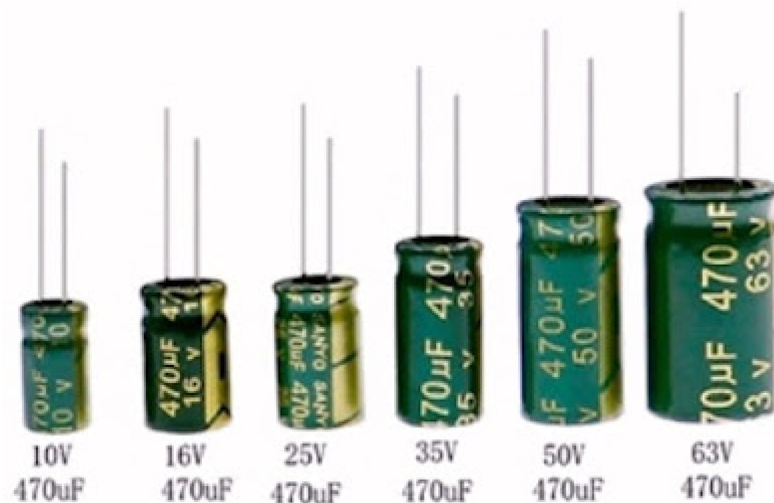
- **De oppervlakte van de platen:**
  Hoe groter de platen, hoe meer capaciteit de condensator heeft.
- **De dikte van het diëlektricum:**
  Hoe dunner deze isolerende laag, hoe groter de capaciteit van het onderdeel.

De eenheid centimeter van een condensator
Als u ooit van plan bent te gaan sleutelen aan heel oude radio's, kunt u hierin condensatoren tegenkomen die zijn gestempeld in een cm-waarde. De centimeter werd vroeger gebruikt voor het uitdrukken van de waarde van condensatoren. De omrekeningsfactor is:

- 1 cm = 1,1 pF
- 1 pF = 0,909 cm

De maximale werkspanning van een condensator

Zoals beschreven bestaat een condensator uit twee geleidende oppervlakken, gescheiden door een isolerende tussenlaag. De capaciteit van een condensator is omgekeerd evenredig met de dikte van de isolerende tussenlaag. Dat wil zeggen dat de capaciteitswaarde toeneemt als de isolerende laag dunner wordt. Als men dus de isolerende laag zo dun mogelijk maakt, heeft men voor het realiseren van een bepaalde waarde van de condensator veel kleinere platen nodig, wat heel wat scheelt in volume en prijs. Dat heeft wél tot gevolg dat u zo'n condensator met een uiterst dun diëlektricum niet zomaar op een spanning van willekeurige grootte kunt aansluiten. Als de spanning boven een bepaalde waarde komt zal het diëlektricum doorslaan en de condensator wordt vernield.
Naast de capaciteit is de maximale werkspanning de tweede belangrijkste grootheid van een condensator. Deze waarde wordt dan ook op iedere condensator vermeld, omdat u er terdege rekening mee moet houden.
In de onderstaande afbeelding hebben wij zes electrolytische condensatoren van 470 µF verzameld met oplopende maximale werkspanning van respectievelijk 10 V, 16 V, 25 V, 35 V, 50 V en 63 V.



Invloed van de werkspanning op de afmetingen.
(© 2024 Jos Verstraten)

De tolerantie van een condensator
Condensatoren zijn producten van een volledig automatische fabricage. Het is dan ook vanzelfsprekend dat er tussen verschillende exemplaren van hetzelfde type condensator met dezelfde opgestempelde waarde afwijkingen bestaan. Deze afwijkingen worden aangegeven door de '*tolerantie*'. Dat is een procent-getal, dat aangeeft met hoeveel procent naar boven of naar beneden de werkelijke waarde van de condensator kan afwijken van de erop gestempelde waarde. Bij de weerstandsfabricage is het zo dat men zonder enige moeilijkheid toleranties van ±2 % in serieproductie kan waarmaken. Bij condensatoren is men nog niet zo ver. U moet rekening houden met een tolerantie van ten minste ±10 %, althans voor de goedkope uitvoeringen, waar u als hobbyist mee te maken krijgt.

De keramische condensator

Algemene eigenschappen
Bij deze condensatoren bestaat het diëlektricum uit een keramisch materiaal. In de meeste gevallen worden de twee elektroden op dit materiaal opgedampt. De verschillende keramische materialen die gebruikt worden, namelijk para-elektrische of ferro-elektrische keramieken, beïnvloeden de elektrische eigenschappen van de condensatoren. Vandaar dat het nauwelijks mogelijk is algemene specificaties te beschrijven van dit soort condensatoren. Er bestaan simpelweg te veel verschillende soorten. Vaak wordt titaniumdioxide gebruikt, hetgeen resulteert in een zeer lineair gedrag van de capaciteitswaarde binnen een bepaald

temperatuurbereik en lage verliezen bij hoge frequenties. Met dit materiaal zijn echter slechts beperkte capaciteitswaarden te produceren.
Voor hogere capaciteitswaarden worden mengsels toegepast van ferro-elektrische materialen zoals bariumtitanaat en specifieke oxiden. Soms worden ook halfgeleidende keramische materialen gebruikt. Nadeel van deze diëlektrica is echter dat zij niet zo stabiel zijn in functie van de temperatuur en hogere verliezen hebben bij hoge frequenties.

Toepassingsklassen
Deze nogal uiteenlopende eigenschappen van keramische condensatoren hebben tot gevolg gehad dat men drie toepassingsklassen heeft gedefinieerd:

- **Klasse 1**
  Hebben een hoge stabiliteit en lage verliezen en worden voornamelijk gebruikt in hoogfrequente resonantie-schakelingen.
- **Klasse 2**
  Worden voornamelijk toegepast voor afvlakking, by-pass, koppeling en ontkoppelingstoepassingen.
- **Klasse 3**
  Hebben halfgeleidende keramische materialen als basis en hebben een heel hoog volumetrisch rendement. Dat betekent dat hoge capaciteitswaarden in een klein volume mogelijk zijn. Deze condensatoren hebben echter slechte elektrische eigenschappen, waaronder een lagere nauwkeurigheid en stabiliteit. De capaciteitswaarde is bovendien afhankelijk van de toegepaste spanning. Typische eigenschap is dat zij verouderen na verloop van tijd.

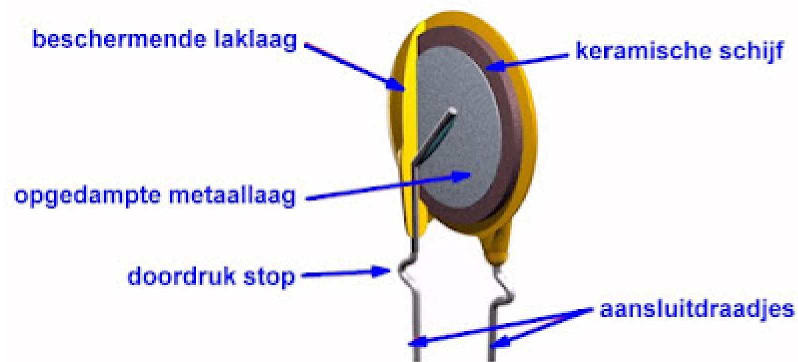
De keramische buiscondensator
Dit is de oudste uitvoering van een keramische condensator. Het onderdeel is opgebouwd uit een klein hol buisje van keramiek, waarop zowel aan de binnen als aan de buitenzijde een dun laagje zilver of tin is opgedampt. Oude buizen-radio's zitten vol met deze onderdelen!



Een typisch voorbeeld van een buisvormige keramische condensator.
(© 2007 Rainer Knäpper - Wikimedia Commons)

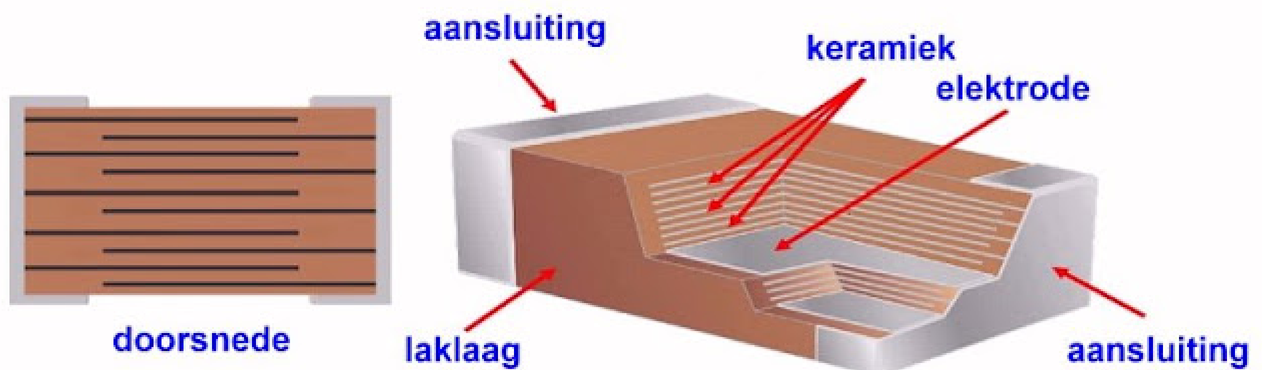
De keramische schijfcondensator
De moderne uitvoering is de schijfcondensator. Deze bestaat uit een schijf van een bepaald keramisch materiaal waar op beide zijden de elektroden zijn opgedampt. Deze onderdelen zijn beschikbaar van 1 pF tot ongeveer 10 µF. Ze worden geproduceerd met werkspanningen van enkele tientallen volt tot duizenden volt, wat ze geschikt maakt voor diverse

toepassingen, van signaalverwerking tot spanningsonderdrukking.



Een typisch voorbeeld van een schijfcondensator.
(© 2012 Elcap - Wikimedia Commons, edit 2024 Jos Verstraten)

De multilayer keramische condensator
Deze MLCC-condensatoren, letterwoord van '*Multi-Layer Ceramic Capacitor*', zijn de moderne uitvoering van keramische condensatoren. MLCC's breiden het toepassingsgebied van keramische condensatoren uit naar toepassingen die grotere capaciteitswaarden in kleine behuizingen vereisen. Op dit moment is het mogelijk een heleboel elco's te vervangen door MLCC's. Deze omschakeling heeft veel bijgedragen aan het miniaturiseren van allerlei schakelingen, zoals smartphones en tablets. In 1993 slaagde TDK erin palladium elektroden te vervangen door veel goedkopere nikkelelektroden, waardoor de massaproductie van MLCC's mogelijk werd.
De MLCC-condensator is opgebouwd uit een keramische behuizing met twee sets overlappende plaatjes. Ze zijn elektrisch gescheiden door diëlektrisch materiaal. Het diëlektrisch materiaal is het belangrijkste element van de condensator en bepaalt de capaciteit, de bedrijfsspanning en een aantal andere belangrijke specificaties van de condensator. In de onderstaande illustratie ziet u hoe zo'n MLCC-condensator is samengesteld.



Samenstelling van een multilayer keramische condensator. (© 2024 Jos Verstraten)

De onderstaande foto toont hoe dergelijke condensatoren er in de praktijk uitzien. Ze zijn leverbaar in through-hole uitvoering en als SMD-component. U herkent ze ongetwijfeld, want iedere moderne printplaat zit er vol mee!

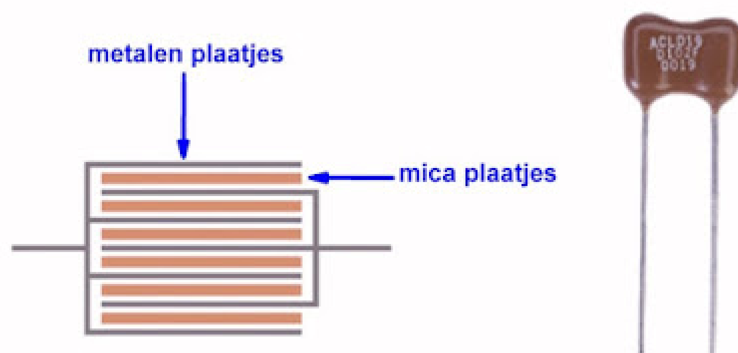


MLCC-condensatoren in de praktijk. (© 2024 Jos Verstraten)

De mica condensator

Wat is mica?
Mica is de verzamelnaam voor een groep van natuurlijk voorkomende mineralen die zich vormen in dunne, flexibele vellen. Het heeft een glanzend uiterlijk en kan gemakkelijk in zeer dunne, transparante lagen worden gesplitst. Het wordt veel gebruikt in verschillende industrieën vanwege zijn isolerende, hittebestendige en chemisch stabiele eigenschappen. De meest voorkomende vormen zijn muscoviet (helder of zilverachtig) en biotiet (donkerbruin of zwart).
Mica wordt sinds het midden van de 19e eeuw gebruikt als condensator diëlektricum. William Dubilier vond in 1909 een kleine micacondensator uit die werd gebruikt in ontkoppelingstoepassingen. Vanaf de jaren 1950 was de mica condensator hét passieve onderdeel voor RF-toepassingen. Dit bleef zo tot het einde van de 20e eeuw, toen de vooruitgang op het gebied van keramische condensatoren leidde tot de vervanging van mica door keramiek in de meeste toepassingen.

De constructie
De constructie van een mica condensator bestaat uit een sandwich van mica plaatjes en metalen plaatjes. Hierbij worden twee opeenvolgende metalen plaatjes iets verschoven, zodat het aan beide uiteinden mogelijk is de plaatjes met elkaar te verbinden met soldeer. Daarna kan deze constructie bedekt worden met epoxy om het onderdeel te beschermen tegen de omgeving. Afhankelijk van de bedrijfsspanning zijn de plaatjes tussen 0,025 mm en 0,125 mm dik. In de onderstaande figuur ziet u deze constructie en een voorbeeld van een dergelijke condensator.



Constructie en voorbeeld van een mica condensator.
(© technologyuk.net)

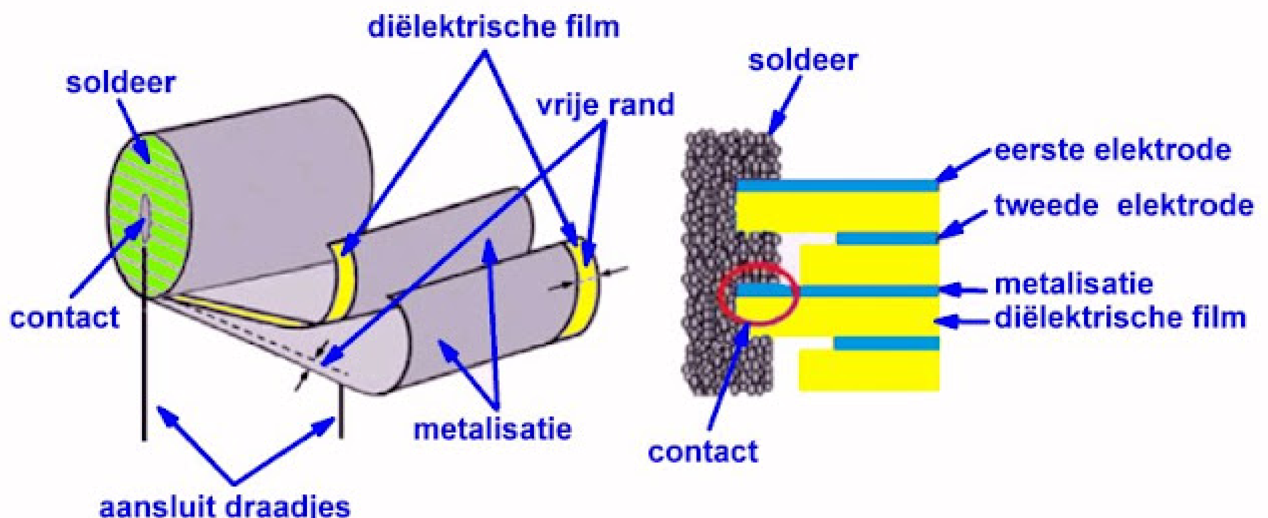
Aluminium, koper of zilver
De metalen plaatjes kunnen bestaan uit een van deze drie metalen. De zilver-mica condensatoren hebben superieure eigenschappen, maar zijn uiteraard duurder dan de twee overige soorten.

Eigenschappen van mica condensatoren
Deze onderdelen kunnen met een zeer kleine tolerantie van ±1 % worden vervaardigd. Het is ook mogelijk hoogspanningscondensatoren tot 10 kV met mica diëlektricum te maken. De leverbare waarden liggen tussen een paar pF en een paar nF. Zij hebben wél een vrij hoge temperatuurscoëfficiënt, namelijk rond de 50 ppm/°C.

De film condensator

Opmerking
Deze condensatoren worden in de praktijk ook wel polyester of mylar condensatoren genoemd. Niet correct, want polyester en mylar zijn slechts twee van de vele diëlektrica die in film condensatoren worden toegepast.

Samenstelling
Film condensatoren zijn condensatoren met een isolerende kunststof film als diëlektricum. Soms wordt deze film gecombineerd met papier als drager van de elektroden. De diëlektrisch film wordt, afhankelijk van de gewenste bedrijfsspanning van de condensator, tot een extreem dunne dikte getrokken en vervolgens voorzien van een geleidende laag. Een zeer dunne (0,03 µm) aluminium metallisatie wordt hiervoor op één zijde aangebracht en deze vormt één van de elektroden van de condensator.
Vervolgens worden twee van deze lagen, onderling iets verschoven, gewikkeld tot een cilindervormige wikkeling, die meestal onder druk wordt afgeplat om de noodzakelijke ruimteop een printplaat te verkleinen. Tot slot worden beide uiteinden van deze wikkeling voorzien van elektroden.
Er bestaan echter ook film condensatoren die op de reeds beschreven manier worden opgebouwd uit een sandwich van plaatjes van het film-diëlektricum met metalen plaatjes.
Filmcondensatoren zijn, samen met keramische condensatoren en elektrolytische condensatoren, de meest gebruikte condensatortypen in elektronische apparatuur.
In de onderstaande figuur ziet u de constructie van een standaard film condensator.

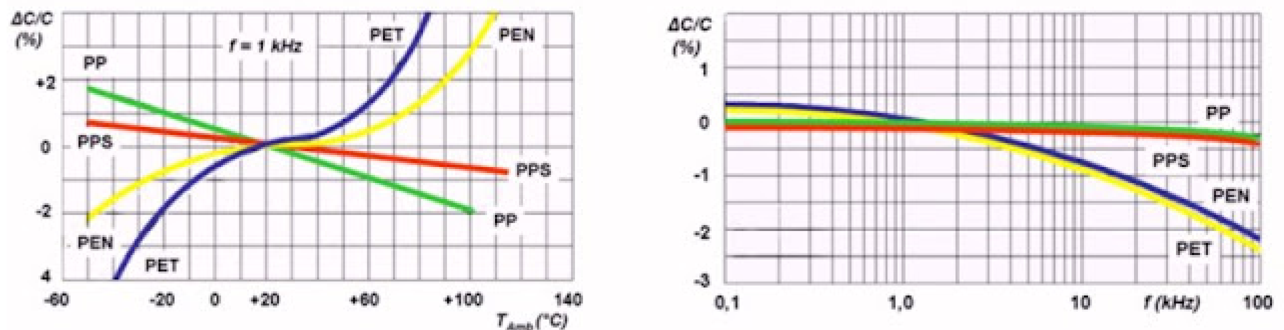


De constructie van een film condensator. (© 2024 H. M. Umran, edit 2024 Jos Verstraten)

Filmmaterialen
In de praktijk worden diverse filmmaterialen toegepast, zoals:
- polypropyleen (PP)
- polyester (PET)
- polyethyleen (PEN)
- polyphenyleen sulfide (PPS)
- polystyreen (PS)

- polycarbonaat (PC)

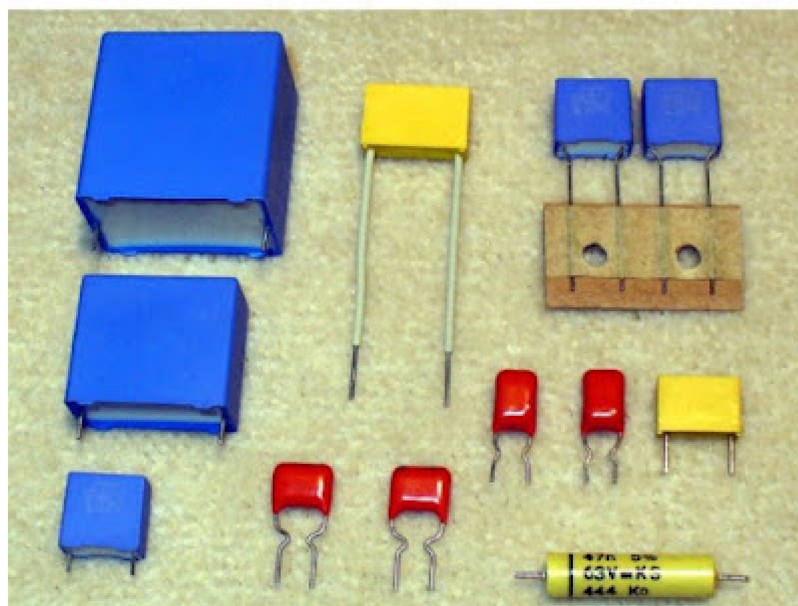
Al die materialen hebben specifieke eigenschappen, zodat het moeilijk is de algemene karakteristieken van film condensatoren te beschrijven. In de onderstaande grafieken ziet u bijvoorbeeld de variaties op de waarde van een condensator in functie van de temperatuur (links) en in functie van de frequentie (rechts) voor diverse filmmaterialen.



De specificaties hangen af van het filmmateriaal. (© 2007 Elcap - Wikimedia Commons)

Uiterlijke kenmerken

Het is absoluut onmogelijk een gezamenlijk uiterlijk kenmerk te benoemen van film condensatoren, waaraan u ze kunt herkennen. Deze typen komen in diverse gedaanten voor, de onderstaande foto geeft een alles behalve compleet overzicht van de uiterlijke verschijningsvorm van deze onderdelen.



Een paar uitvoeringen van film condensatoren.
(© 2010 Jens Both - Wikimedia Commons)

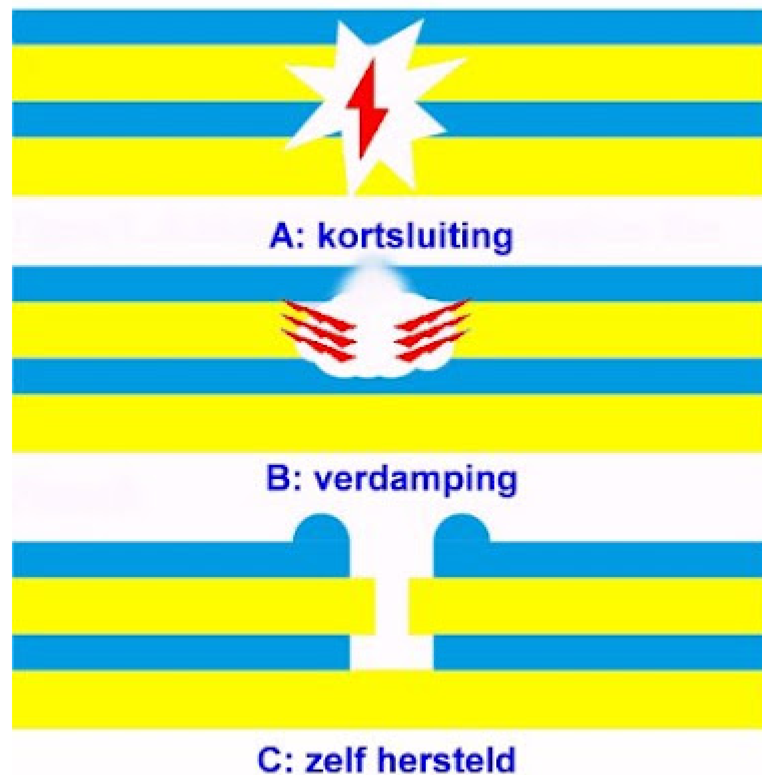
De zelfherstellende eigenschap van film condensatoren

Een zeer belangrijke eigenschap van gemetalliseerde film condensatoren moet even worden besproken. Deze onderdelen zijn namelijk zelfherstellend. Dat wil zeggen dat, als de condensator doorslaat als gevolg van een hoge spanningspuls over het onderdeel, de condensator niet definitief onherstelbaar beschadigd wordt. Rond de plaats waar de doorslag door de filmisolatie heeft plaats gevonden verdampt de zeer dunne metaallaag op de folie. Hierdoor heft de kortsluiting op de doorslag plek zichzelf automatisch op en blijft de condensator zijn functie vervullen.

Het defect dat de kortsluiting veroorzaakte, wordt weggebrand en de resulterende dampdruk blaast de vlamboog ook weg. Dit proces kan in minder dan 10 µs voltooid zijn, vaak zonder de nuttige werking van de getroffen condensator te onderbreken.

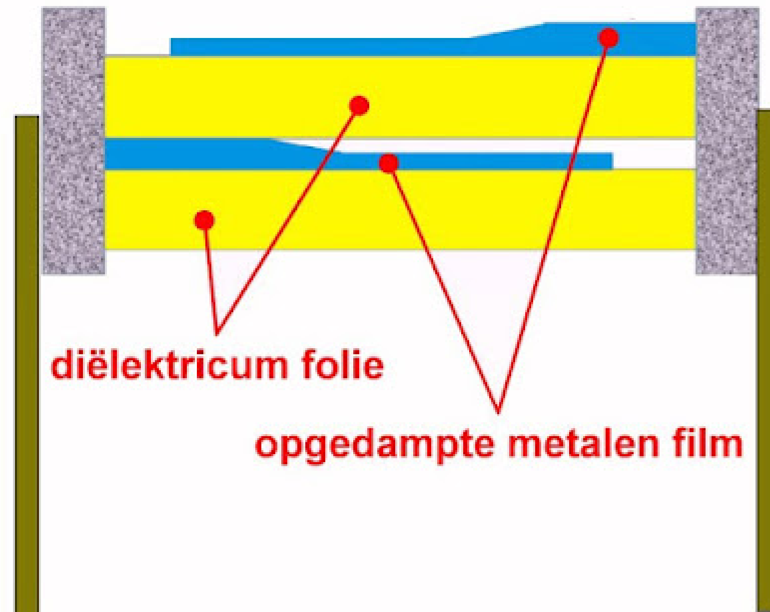
Dit proces is nog eens grafisch toegelicht in de onderstaande figuur.

- **A:**
  Op een zwakke plek in de constructie, bijvoorbeeld een foutje in de film (geel), ontstaat een kortsluiting tussen de twee elektroden (blauw).
- **B:**
  De hitte van het vonkje doet de metaallaag én de folie plaatselijk smelten en verdampen, waardoor de kortsluiting verdwijnt.
- **C:**
  Plaatselijk is nu een micro-gaatje ontstaan in de folie en de metaallagen. De condensator heeft de zwakke plek in zijn constructie dus zelfstandig geëlimineerd en leeft nog lang en gelukkig.



De zelf herstellende werking verklaard. (© Tervakoski Film)

Shape-Optimized Metallization: Low-ESR film condensatoren
De '**ESR**', de '*Equivalente Serieweerstand*' (lees verder) is een belangrijke eigenschap van condensatoren. Deze grootheid bepaalt hoe groot de stroom is die de condensator kan verwerken zonder te veel op te warmen. Het is voor bepaalde toepassingen van belang deze grootheid zo laag mogelijk te maken. Bij film condensatoren is dat gemakkelijk mogelijk door de dikte van de opgedampte lagen niet constant te houden, maar dikker te maken bij de zijkanten waar de lagen worden verbonden met de aansluitdraadjes. Deze techniek noemt men '*Shape-Optimized Metallization*' en wordt voorgesteld in de onderstaande figuur. Daar waar de metallisatie-laag contact maakt met de aansluitdraadjes is deze dikker dan in de rest van de condensator. Op deze plaats kunnen dus veel meer vrije elektronen opgeborgen worden, met als gevolg dat de plaatselijke weerstand laag is. De piekstroom die de condensator zonder opwarmen kan verwerken is dus vele malen groter dan bij een soortgenooot met egaal opgedampte elektroden.

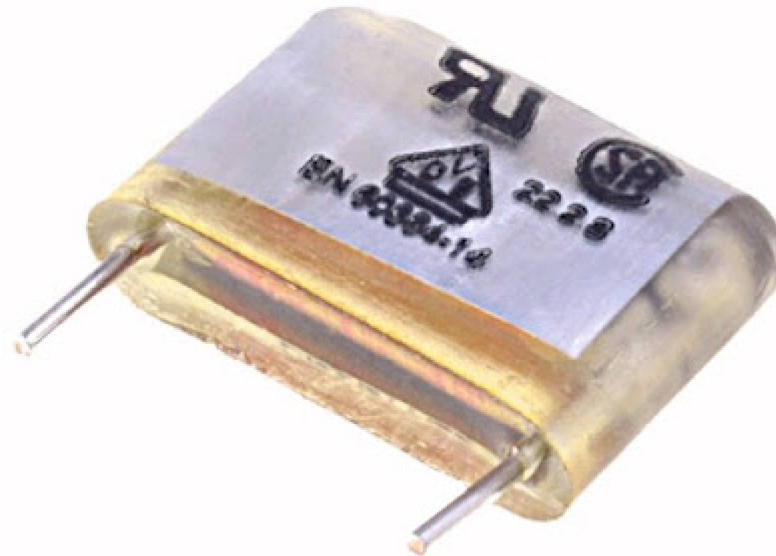


De 'Shape-Optimized Metallization' verklaard.
(© 2012 Elcap - Wikimedia Commons, edit 2024 Jos Verstraten)

De papier condensator

Vooral in oude radio's uit het buizentijdperk
In de begindagen van de radio werden condensatoren gemaakt door papier, gedrenkt in minerale olie, tussen twee stroken aluminiumfolie te leggen, het geheel op te rollen, draden aan de twee stukken aluminiumfolie te bevestigen en de opgerolde folie en het papier in een cilindervormig omhulsel te plaatsen.
In wezen is de fabricage dus volledig te vergelijken met deze van film condensatoren. Het enige verschil is dat papier veel slechtere eigenschappen heeft dan de moderne films en dat zowel de papier- als de aluminium-laag veel dikker zijn dan bij de film typen. Die dikkere lagen maken hogere bedrijfsspanningen mogelijk, maar verlagen de maximaal haalbare waarde.

Metallized Paper Capacitor (MPC)
De oorspronkelijke geïmpregneerd papier condensatoren zijn volstrekt verouderd, maar u zult ze nog vaak aantreffen als u oude radio's en beeldbuis TV's repareert. Ze werden gemaakt met waarden van ongeveer 0,001 µF tot 0,1 µF en kunnen lage tot gemiddelde spanningen aan, meestal tot ongeveer duizend volt.
Er zijn nog steeds fabrikanten die papier condensatoren maken en u kunt deze typen bij de meeste goed gesorteerde postorder bedrijven kopen. Deze onderdelen heten nu '***M**etallized **P**aper **C**apacitors*' (*MPC*) en zij worden vaak toegepast in bijvoorbeeld netfilters. WIMA levert bijvoorbeeld de MP3-X2 serie met waarden van 1.000 pF tot 1,0 mF en bedrijfsspanningen tot 630 V. Zij hebben een tolerantie van ±20 %.



Een 'Metallized Paper Capacitor' van WIMA. (© WIMA)

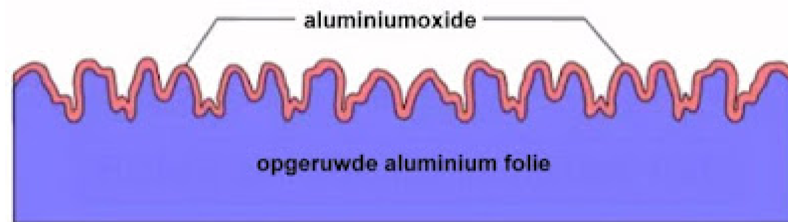
De elektrolytische condensator (elco)

Een heel dun diëlektricum
In de inleiding van dit artikel werd reeds gesteld dat de waarde van een condensator omgekeerd evenredig is met de dikte van het diëlektricum. Hoe dunner die isolerende laag, hoe groter de waarde van de condensator voor een gelijk blijvend oppervlak van de elektroden. Nu bestaan er bepaalde technologische grenzen aan de dikte van een folie of een film die men nog kan maken. Maar waarom de natuur niet zélf inschakelen voor het maken van een microscopisch dunne isolerende laag? Dat is precies wat er gebeurt bij de elektrolytische condensatoren of elco's.

De basis werking van een elco
Een elektrolytische condensator is een gepolariseerde condensator waarvan de anode of positieve plaat gemaakt is van een metaal. Die elektrode vormt rond zichzelf een isolerende oxidelaag door een elektrochemisch proces dat '*anodisatie*' heet. Deze oxidelaag is microscopisch dun en vormt het diëlektricum van de condensator. Er moet natuurlijk een tweede elektrode aanwezig zijn. Die is er onder de vorm van een vaste, vloeibare of gelvormige chemische elektrolyt. Dit materiaal is elektrisch geleidend en bedekt het oppervlak van de dunne oxidelaag. Dit materiaal vormt de kathode of negatieve elektrode van de condensator.
Vanwege de zeer dunne diëlektrische oxidelaag en het grote anode-oppervlak hebben elco's een veel hoger capaciteit/spanning-product per volume-eenheid dan keramische of film condensatoren. Zij kunnen dus veel grote capaciteitswaarden hebben.

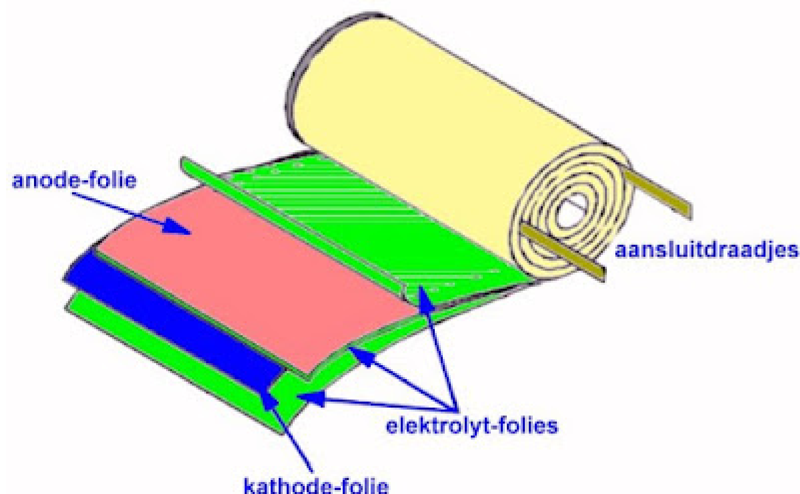
Het natuurkundig verschijnsel van '*anodisatie*'
Het fenomeen dat er een elektrochemisch proces bestaat waardoor metalen zoals aluminium, tantaal, niobium, mangaan, titanium, zink en cadmium een oxidelaag kunnen vormen vanuit een elektrolyt werd voor het eerst waargenomen in 1857 door de Duitse natuurkundige en scheikundige Johann Heinrich Buff. Deze man ontdekte dat die oxidelaag ontstaat als er een elektrische stroom in één richting door de metaal/elektrolyt-grens gaat vloeien.
Charles Pollak ontdekte dat de oxidelaag op een aluminium anode stabiel bleef in een neutrale of alkalische elektrolyt, zelfs als de stroom werd uitgeschakeld. In 1896 vroeg hij patent aan voor een '*Elektrischer Flüssigkeitskondensator mit Aluminiumelektroden*'. Dit onderdeel was gebaseerd op zijn idee om de oxidelaag toe te passen als diëlektricum in een gepolariseerde condensator in combinatie met een neutrale of licht alkalische elektrolyt.

Het vormen van de oxidelaag op de anode
Als anode wordt een dunne folie van een van de genoemde metalen gebruikt. Het oppervlak wordt aan één kant flink opgeruwd. Dit heeft als voordeel dat het actieve oppervlak flink wordt vergroot waardoor grotere capaciteitswaarden mogelijk zijn. Deze folie wordt door een zogenaamd formatie-bad gevoerd waarin vloeibaar elektrolyt aanwezig is. De folie wordt aangesloten op de positieve pool en de metalen bak waarin het elektrolyt zit op de negatieve pool van een gelijkspanning. Op deze manier wordt de folie voorzien van de isolerende oxidelaag.



Het vormen van de oxidelaag op de anode. (© www.doeeet.com)

De constructie van de elco
In de onderstaande figuur is schematisch voorgesteld hoe een elco is opgebouwd. De van een oxidelaag voorziene anode-folie wordt samen met een andere metalen folie, die de kathode vormt, en een paar met elektrolyt geïmpregneerde folies tot één geheel gevormd. Deze sandwich-folie wordt dan weer opgerold. Het introduceren van een extra kathode-folie in de buurt van de anode zorgt voor het verkleinen van de inwendige weerstand van de elco.



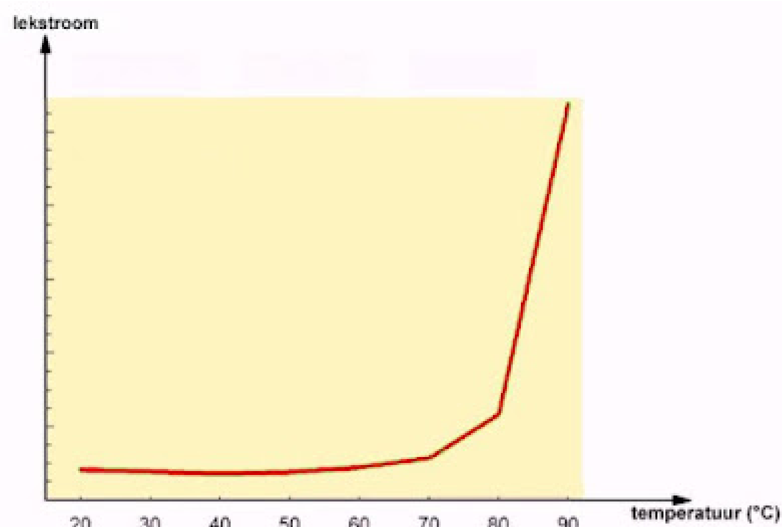
De constructie van een elco.
(© www.solidstatecontrolsinc.com, edit 2024 Jos Verstraten)

Een elco is gepolariseerd en overspanningsgevoelig
Elektrolytische condensatoren zijn gepolariseerde onderdelen! Dat wil zeggen dat de spanning op de anode altijd positiever moet zijn dan de spanning op de kathode. De polariteit is altijd aangegeven op de behuizing van het onderdeel. Als u per ongeluk de anode negatiever maakt dan de kathode kan het diëlektricum beschadigen wat resulteert in een voorgoed defecte condensator. Een elco is ook heel gevoelig voor te hoge spanning. Als u een spanning over het onderdeel zet die maar 1,5 V hoger is dan de aangegeven bedrijfsspanning kan het onderdeel al doorslaan. Dat doorslaan van een elco is een lawine-achtig effect dat resulteert in een vrijwel volledige kortsluiting tussen anode en kathode, waarbij een heleboel thermische energie wordt gegenereerd. Om te verhinderen dat de gasvorming in het onderdeel tot een explosie leidt zijn alle elco's voorzien van een beveiliging. In de meeste gevallen komt dit neer op een tijdens de fabricage aangebrachte zwakke plek in de aluminium behuizing. Dit noemt men de '*vent port*'. Bij het opbouwen van druk in de elco barst de behuizing op die plaats open en kunnen de gassen ontsnappen zonder explosie.



Een elco waarvan de 'vent port' is open gebarsten.
(© 2024 Jos Verstraten)

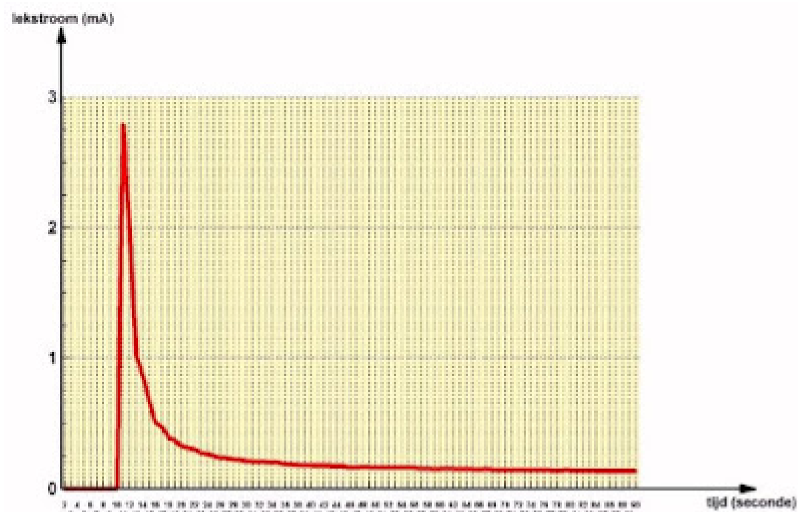
Een elco heeft een lekstroom
Alle in de vorige paragrafen besproken condensator typen hebben, aangesloten op een constante gelijkspanning, na het snel opladen een oneindig hoge weerstand. Er vloeit onder die omstandigheid dus absoluut geen stroom door het onderdeel. Dat is niet het geval bij elco's. Ook als de spanning over het onderdeel constant blijft zal er tóch een kleine gelijkstroom door het onderdeel vloeien. Dit noemt men de '*lekstroom*' en dat is een belangrijke specificatie van elco's. Uiteraard is het belangrijk dat deze stroom zo klein mogelijk is. De waarde ligt in het µA-bereik, maar is afhankelijk van de waarde en van de temperatuur.
In de onderstaande grafiek ziet u bijvoorbeeld hoe de lekstroom (groene grafiek) van een 1.000 µF elco snel toeneemt als de temperatuur groter wordt dan 70 °C.



De lekstroom in functie van de temperatuur.
(© 2021 Jos Verstraten)

Het formeren van een lang niet gebruikte elco
De lekstroom hangt ook af van de tijd dat een elco ongebruikt in een lade heeft gelegen of spanningsloos in een zeer zelden gebruikt apparaat zit. De oxidelaag op de anode breekt namelijk heel langzaam af als de elco spanningsloos is. Bij het verbinden van zo'n elco met een gelijkspanning zal er in eerste instantie een zeer grote stoom vloeien, die nadien langzaam afneemt tot de gespecificeerde waarde. Door het onder spanning zetten van de elco wordt de oxidelaag op de anode weer langzaam opgebouwd. Dit proces noemt men het

'*formeren*' van de elco.



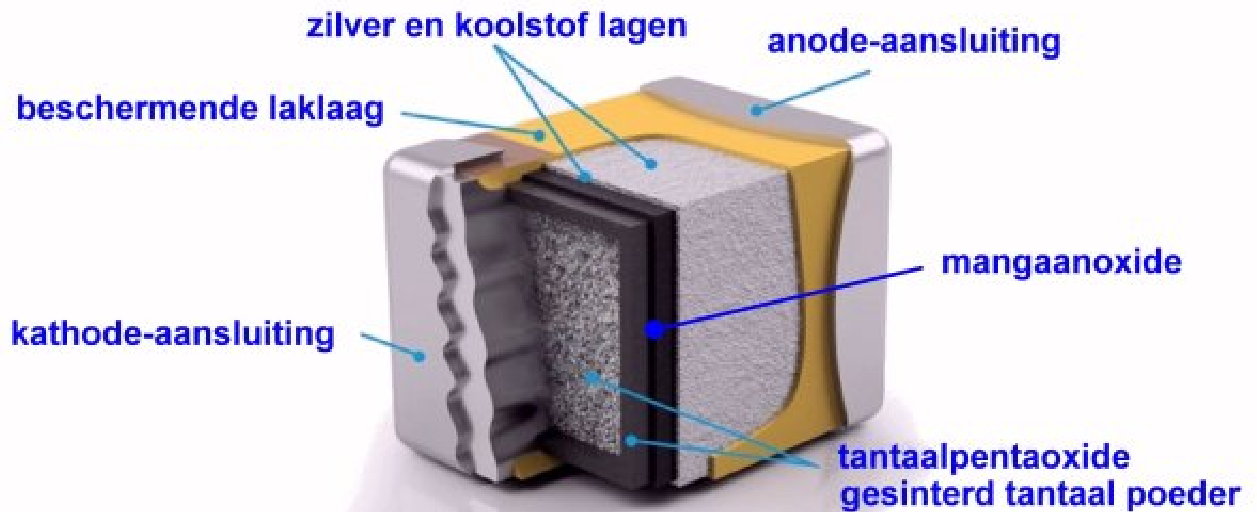
De lekstroom bij het formeren van een lang niet gebruikte elco.
(© 2021 Jos Verstraten)

Waarden en spanningen
Elco's worden aangeboden in de standaard E12 waarden van ongeveer 1 µF tot 22.000 µF: 1 µF ~ 2,2 µF ~ 3,3 µF ~ 4,7 µF ~ 10 µF ~ 22 µF ~ 33 µF ~ 47 µF ~ 100 µF ~ 220 µF ~ 330 µF ~ 470 µF ~ 1.000 µF ~ 2.200 µF ~ 3.300 µF ~ 4.700 µF ~ 10.000 µF ~ 22.000 µF.
De gebruikelijke bedrijfsspanningen zijn 6,3 V ~ 10 V ~ 16 V ~ 25 V ~ 35 V ~ 50 V ~ 63 V ~ 100 V ~ 160 V ~ 200 V ~ 250 V ~ 400 V ~ 450 V.

De tantaal condensator

Een speciaal soort elco
Tantaal condensatoren zijn een speciaal soort elektrolytische condensatoren die u kunt toepassen als u relatief stabiele parameters nodig hebt in een (semi)professioneel ontwerp of moet ontwerpen op een printplaat met beperkte afmetingen. Tantaal condensatoren worden immers gekarakteriseerd door zeer stabiele eigenschappen, ook bij hoge temperatuur, en een langere levensduur dan gewone elco's. Hun eigenschappen blijven bovendien stabiel als zij lang niet worden gebruikt. Zij zijn kleiner dan de aluminium elco's met gebruikelijke waarden van 1,0 µF tot 100 µF bij maximaal 35 V. Net als gewone elco's zijn tantaal-elco's gepolariseerd, het omkeren van de + en - aansluiting heeft depolarisatie tot gevolg en kan zelfs leiden tot ontploffen vanwege de grote hitte die dan vrijkomt. Zij hebben immers geen '*vent port*' zoals aluminium elco's.
Tantaal condensatoren zijn echter duurder en hebben een kleiner bereik van beschikbare capaciteits- en spanningswaarden.

De constructie
De anode is samengesteld uit gesinterd tantaal poeder, bedekt met een isolerende laag tantaalpenta-oxide (Ta_2O_5) dat het diëlektricum vormt. Dit klontertje metaal is omgeven door een vloeibare of vaste elektrolyt als kathode, meestal mangaanoxide. Via lagen van zilver en koolstof wordt een goed elektrisch contact verzekerd met de aansluitpad's van het onderdeel. Vanwege de zeer dunne diëlektrische laag en het grote elektrode-oppervlak onderscheidt de tantaal condensator zich van conventionele elektrolytische condensatoren door een hoge capaciteit per volume (hoog volumetrisch rendement) en een lager gewicht. Zij zijn dus veel kleiner dan aluminium elco's.



Constructie van een tantaal condensator in SMD-uitvoering.
(© www.samaterials.com, edit 2024 Jos Verstraten)

Geo-politieke problemen
Tantaal is echter een grondstof met een zeer slechte reputatie. Het wordt gewonnen uit het mineraal Coltan dat hoofdzakelijk in conflictgebieden zoals de Democratische Republiek Congo wordt gewonnen, vaak via kinderarbeid. Dat maakt het gebruik van tantaal condensatoren in producten omstreden.

Praktische uitvoering
In de onderstaande foto ziet u een aantal tantaal condensatoren in through-hole uitvoering.



Praktische uitvoering van tantaal condensatoren.
(© www.eeo-bv.nl)

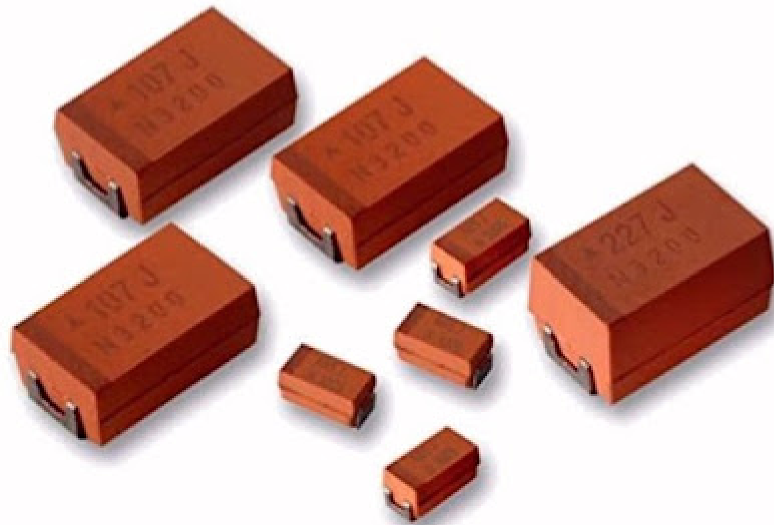
De niobium condensator

De opvolger van de tantaal elco?
De problemen met de grondstof tantaal hebben een zoektocht op gang gezet naar materialen met soortgelijke eigenschappen, maar met minder geo-politieke problemen. Als resultaat vond men niobium, een metaal dat overvloediger in de aarde voorkomt en dus goedkoper is dan tantaal.

De samenstelling van een niobium condensator

Het fabricageproces is vergelijkbaar met dat van de tantaal condensator. Voor de anode maakt men gebruik van niobiumpoeder dat wordt geperst en gesinterd om een poreuze structuur te vormen. Op dit gesinterde poeder wordt een dunne laag niobiumpenta-oxide (Nb_2O_5) elektrochemisch gevormd dat dient als het diëlektricum. Voor de kathode gebruikt men een geleidende polymeer of een vloeibaar elektrolyt.

Voor- en nadelen
Bij eenzelfde omvang hebben niobium condensatoren een lagere capaciteit dan tantaal condensatoren. Bovendien is de maximale bedrijfsspanning lager. Ze zijn echter minder gevoelig voor kortsluiting dan tantaal condensatoren. Op dit moment zijn zij nog vrij prijzig.



Praktische uitvoering van niobium condensatoren. (© Kyocera AVX)

De supercondensator

Iets tussen elco en batterij
Een supercondensator is een condensator met een zeer hoge capaciteit, maar met een lage maximale bedrijfsspanning. Zij zijn in staat tien tot honderd keer meer energie per volume-eenheid op te slaan dan elektrolytische condensatoren. De waarden van dergelijke componenten liggen in het farad-bereik! Bovendien kunnen zij veel sneller lading opnemen en afgeven dan batterijen en kunnen zij veel vaker op- en ontladen worden dan oplaadbare batterijen.

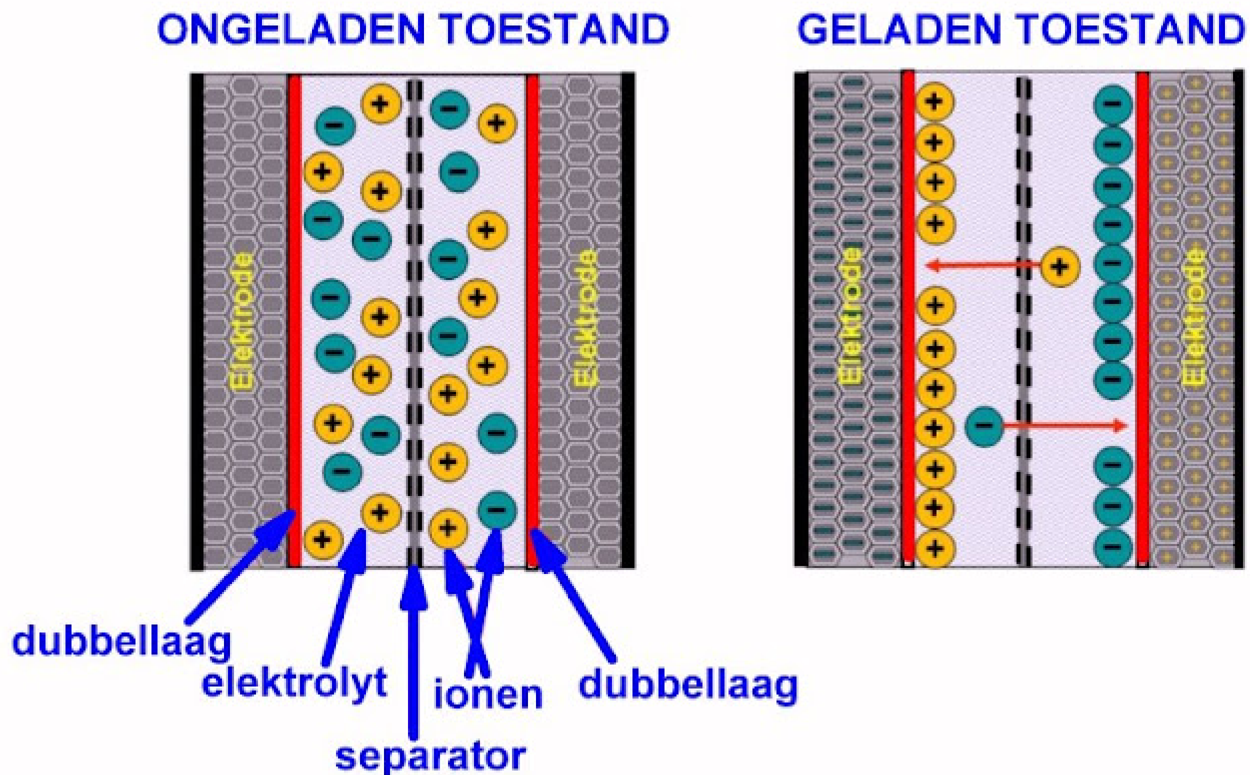
De samenstelling
De elektroden zijn gemaakt van materialen met een groot oppervlak, zoals actief koolstof of grafeen. Dit vergroot de hoeveelheid lading die kan worden opgeslagen. Tussen de elektroden zit een elektrolyt, een vloeibare of gelachtige stof die ionen bevat om lading over te dragen tussen de elektroden. Daarnaast is nog een separator aanwezig, een dun membraan dat voorkomt dat de elektroden direct contact maken, maar ionen wel toelaat om te bewegen tussen de elektroden.

De werking
De technologie is niet te vergelijken met deze van alle tot nu toe besproken condensator-typen. Zij maken geen gebruik van een vast diëlektricum, maar werken dank zij de principes van '*elektrostatische dubbellaag capacitantie*' of '*elektrochemische pseudo-capacitantie*'.

Elektrostatische dubbellaag capacitantie (EDLC)
Dit is het vermogen van een materiaal om elektrische lading op te slaan in een dubbellaag, die ontstaat op het grensvlak tussen een elektrode en een elektrolyt. De ionen in de elektrolyt

vormen een ladingslaag tegenover de geladen elektrode, gescheiden door een nanometer dunne isolerende laag.
De dubbellaag bestaat uit de zogenaamde Helmholtz-laag. Dit is de eerste laag van ionen die zich direct op het oppervlak van de elektrode vestigt. De tweede laag is de diffusielaag, een meer verspreide laag van ionen die verder van het oppervlak ligt, maar nog steeds wordt beïnvloed door de elektrische kracht van de elektrode.
Als de elektrode op een spanning wordt gezet, trekt deze ionen van tegenovergestelde lading aan uit de elektrolytische oplossing. De nabijheid van tegengestelde ladingen (elektrode en ionen) leidt tot de vorming van de dubbellaag. Deze dubbellaag fungeert als een condensator, waarin de elektrode en de ionenlaag de twee platen van de condensator vormen, gescheiden door een uiterst dunne isolerende laag (het diëlektricum).
Omdat de waarde van een condensator omgekeerd evenredig is met de dikte van het diëlektricum kan men op deze manier extreem hoge waarden fabriceren, maar met een zeer beperkte maximale bedrijfsspanning.

Elektrochemische pseudo-capacitantie
Dit natuurkundige proces beschrijft elektronenoverdracht tussen een elektrode en ionen in de elektrolyt waarbij de ionen worden opgenomen in de interne structuur van elektroden zonder dat er veranderingen in het kristalrooster tot stand komen. In tegenstelling tot de fysieke opslag van lading in een elektrochemische dubbellaag capacitantie, waarbij geen chemische reacties optreden, berust pseudo capacitantie op elektrochemisch actieve processen.



De werking van een supercondensator.
(© 2011 Elcap - Wikimedia Commons, edit 2024 Jos Verstraten)

Supercondensatoren in de praktijk
Op de onderstaande foto ziet u zo'n '*supercap*' met een waarde van 1 farad en een bedrijfsspanning van 5,5 V_{dc}. Dit exemplaar is van NEC/TOKIN en kost € 1,04. U kunt op dit moment supercap's kopen met een waarde van niet minder dan 3.000 F en met een bedrijfsspanning van 2,3 V.



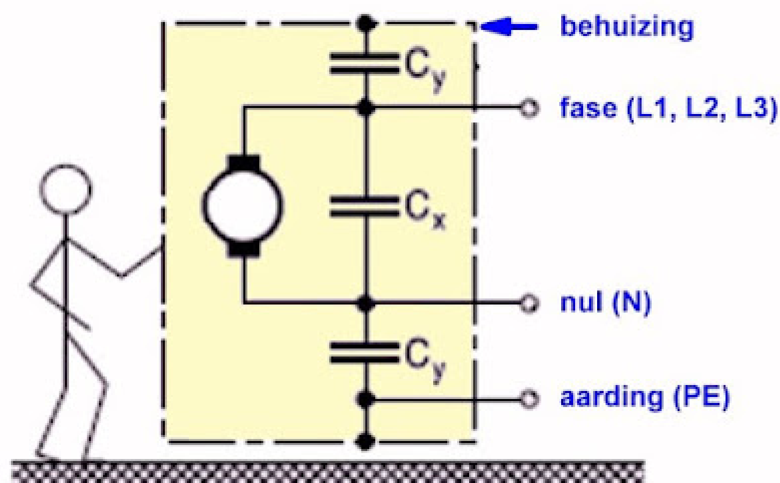
Een leverbare uitvoering van een supercap.
(© NEC/TOKIN)

X- en Y-condensatoren

Wat zijn X- en Y-condensatoren?
X- en Y-condensatoren zijn speciale typen condensatoren die in schakelingen worden gebruikt voor de onderdrukking van elektromagnetische storingen (EMI) en het waarborgen van de elektrische veiligheid. Ze worden vaak toegepast in netfilters en schakelingen die met de netvoeding werken. Er zijn diverse types gespecificeerd, die wij nu in het kort aan u voorstellen.

De X-condensatoren
Deze condensatoren worden gebruikt om storingen te onderdrukken die tussen twee wisselspanning voerende geleiders (de fase en de nul) optreden. Dit noemt men '*differentiële modus storing*'. Ze zijn ontworpen om spanningspieken te filteren en zijn dus bestand tegen hoge spanningen.
Zij worden ingedeeld in drie groepen X1, X2 of X3, afhankelijk van de spanning waarvoor ze ontworpen zijn:

- X1: Voor spanningen tot 4,0 kV piek.
- X2: Voor spanningen tot 2,5 kV piek.
- X3: Voor spanningen tot 1,2 kV piek.



De plaats van X- en Y-condensatoren. (© DigiKey)

De Y-condensatoren
Deze condensatoren worden gebruikt om storingen te onderdrukken tussen een stroomvoerende geleider en de aarde. Dit noemt men '*common mode storing*'. Zij worden geschakeld tussen de fase/nul en de aarde-geleider. Zij hebben een lagere capaciteit dan X-condensatoren om te voorkomen dat er een te grote lekstroom naar de aarde gaat vloeien. Zij worden ingedeeld in vier groepen Y1 tot en met Y4, afhankelijk van hun veiligheidsniveau:
- Y1: Voor toepassingen met isolatie vereisten tot 8 kV piek.
- Y2: Voor toepassingen met isolatie vereisten tot 5 kV piek.
- Y3: Niet gespecificeerd.
- Y4: Voor toepassingen met isolatie vereisten tot 2,5 kV piek.

De eigenschappen van condensatoren

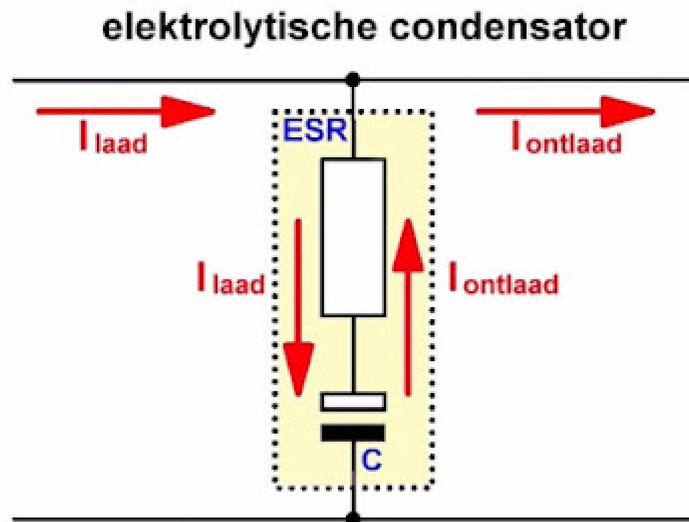
Overige parameters van condensatoren
In de vorige paragrafen van dit artikel hebben wij een aantal eigenschappen of parameters van een condensator reeds besproken: de capaciteit, de werkspanning, de tolerantie en de lekstroom van elco's. Er bestaan echter parameters die u in datasheets kunt tegenkomen en die wel wat nadere toeliching behoeven. Wij hebben het over begrippen als:
- De equivalente serieweerstand (ESR)
- De verlieshoek (δ)
- De kwaliteitsfactor (Q)
- De dissipatiefactor (D)
- De reactantie (Xc)
- De rimpelstroom

Tot slot van dit uitgebreide artikel zullen wij deze parameters even toelichten. U moet er echter rekening mee houden dat voor het écht begrijpen van hun betekenis een behoorlijke dosis basiskennis van de theoretische elektriciteitsleer nodig is.

De equivalente serieweerstand (ESR) van een condensator
De ESR (***E**quivalent **S**erial **R**esistance*) is een virtuele weerstand die in serie staat met de capaciteit C van de elco. De ESR is een gevolg van de manier waarop een condensator technologisch in elkaar zit. Vooral grote condensatoren, dus elco's, hebben erg veel last van deze weerstand. De normale waarde van de ESR is afhankelijk van de capaciteit en van de maximale spanning.
Een paar waarden om u een indruk te geven, die echter van merk tot merk kunnen verschillen:
- 4,7 µF en 10 V: 40,0 Ω
- 470 µF en 63 V: 0,20 Ω
- 4.700 µF en 25 V: 0,03 Ω

De ESR is voornamelijk van belang bij elco's in de afvlakking van voedingsschakelingen. Door zo'n elco vloeien twee stromen. Enerzijds een laadstroom I_{laad} van de gelijkrichter naar de elco, anderzijds een ontlaadstroom $I_{ontlaad}$ van de elco naar de aangesloten elektronische schakeling. Deze twee stromen vloeien ook door de ESR en dat heeft twee vervelende gevolgen. Een stroom die door een weerstand vloeit wekt over de weerstand een spanning op en wel volgens de formule U = I • R. Spanning is stroom vermenigvuldigd met weerstand. Het zal duidelijk zijn dat de spanning die over de ESR ontstaat niet ter beschikking staat voor de te voeden schakeling. Hoe groter de ESR, hoe meer spanning er verloren gaat. Een stroom die door een weerstand vloeit wekt bovendien vermogen op en wel volgens de formule P = U • I. Vermogen is spanning vermenigvuldigd met stroom. Dat vermogen veroorzaakt opwarming van de ESR en dus ook van de condensator. Deze opwarming heeft een verhoging van de ESR tot gevolg. De kwaliteit van de elco gaat langzaam maar zeker achteruit en op een bepaald moment is de ESR zo groot geworden dat de voeding niet meer

goed werkt en/of de elco er de brui aan geeft.

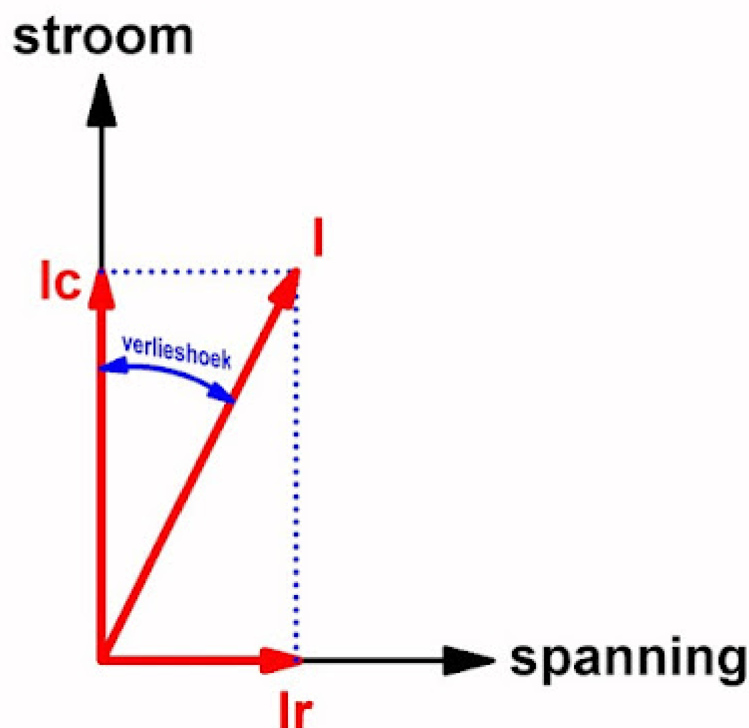


Stromen door de elco in de voeding. (© 2024 Jos Verstraten)

De verlieshoek (δ) van een condensator

De verlieshoek δ van een condensator is een maat voor de kwaliteit van het diëlektricum. Een praktische condensator gevoed met wisselspanning kunt u beschouwen als een ideale condensator C, parallel aan een ideale weerstand R. Een wisselspanning die u over de condensator zet zal dus aanleiding geven tot een gewenste stroom i_c door de condensator en een ongewenste stroom i_r door de weerstand. De stroom door de weerstand is in fase met de aangelegde wisselspanning. Door de ideale condensator loopt een stroom i_c die 90° voor-ijlt op de spanning. Beide stromen kunnen grafisch worden voorgesteld door vectoren in een vectordiagram. Volgens de wetten van de elektricieitsleer kunt u beide deelsstromen combineren tot de reële stroom i. De verlieshoek (δ) is de hoek tussen de vector van de stroom i_c en de vector van de stroom i.

De verlieshoek geeft dus de verhouding weer tussen de energie die wordt opgeslagen in de condensator en de energie die wordt gedissipeerd door verliezen, zoals in de wisselweerstand van de elektroden en het diëlektricum.



De kwaliteitsfactor (Q) van een condensator
De kwaliteitsfactor of Q-factor van een condensator is een maat voor de efficiëntie van de condensator in een wisselstroomcircuit en geeft aan hoe goed de condensator energie opslaat versus hoeveel energie hij verliest. De Q-factor wordt als volgt gedefinieerd:
$Q = 1 / \tan(\delta)$
De kwaliteitsfactor Q is een parameter zonder eenheid, dus gewoon een getal.
Een hoge Q-factor betekent dat de condensator zeer efficiënt is in het opslaan van energie met minimale verliezen. Dit is vooral belangrijk in hoogfrequenttoepassingen zoals filters, resonante kringen, en RF-circuits.

De dissipatiefactor (D) van een condensator
De dissipatiefactor (D) van een condensator is een maat voor de energieverliezen in een condensator tijdens het opladen en ontladen. D wordt ook wel de dissipatietangens genoemd en wordt meestal aangegeven met de afkorting tan(δ), waarbij δ de verlieshoek is.
De dissipatiefactor D (meestal in een percentage uitgedrukt) is de verhouding van de reactantie X_c tot de parallelweerstand R_s van de condensator:
$D = [X_c / R_s] \cdot 100\%$

De reactantie (X_c) van een condensator
De reactantie (X_c) van een condensator is een maat voor de weerstand die een condensator biedt tegen het vloeien van een wisselstroom door het onderdeel. Deze grootheid hangt af van de frequentie van de wisselstroom en de grootte van de capaciteit van de condensator.
De reactantie X_c wordt gegeven door de formule:
$X_c = 1 / [2 \cdot \pi \cdot f \cdot C]$
De waarde van de reactantie wordt uitgedrukt in ohm, net zoals het begrip gelijkstroomweerstand. Vandaar dat met de reactantie ook wel eens de wisselstroomweerstand of de impedantie noemt.

De rimpelstroom van een condensator
De rimpelstroom van een condensator verwijst naar de wisselstroom die door de condensator vloeit in schakelingen waar een gelijkspanning over de condensator staat, waarop een wisselspanning gesuperponeerd is. Dit komt voor in bijvoorbeeld voedingen, vermogensomzetters en filters.
Na gelijkrichting van wissel- naar gelijkspanning in een voeding ontstaat een resterende 100 Hz rimpelspanning op de uitgangsspanning, die een rimpelstroom door de filtercondensator veroorzaakt. Deze stroom wekt over de ESR een verliesvermogen op. Dit vermogen uit zich onder de vorm van thermische energie die een opwarming van de condensator veroorzaakt. Vandaar dat iedere elco slechts een bepaalde maximale rimpelstroom mag verwerken. Als deze waarde wordt overschreden, kan de condensator oververhit raken met een flinke verslechtering van al zijn parameters tot gevolg.